果蔬品质劣变传感检测与监测技术研究进展

郭志明[1,2*]，王郡艺[1]，宋　烨[3]，邹小波[1,2]，蔡健荣[1]

（1. 江苏大学 食品与生物工程学院，江苏镇江 212013；2. 江苏省智能农业与农产品加工国际合作联合实验室，江苏镇江 212013；3. 中华全国供销合作总社济南果品研究院，山东济南 250220）

摘　要：果蔬在采后贮藏和运输过程中极易发生品质劣变，食用价值降低且造成巨大的经济损失。为保障果蔬品质，减少产后劣变导致的资源浪费，本文综述了果蔬品质劣变传感检测与监测技术最新研究现状，分析了各类检测技术的原理、特点及优缺点。其中，机器视觉可检测果蔬外部品质和表面缺陷，电子鼻可监测果蔬的劣变气味，近红外光谱可检测果蔬内部品质和隐性缺陷，高光谱成像能实现可视化检测果蔬内外品质、监测劣变过程，拉曼光谱可检测果蔬腐败菌及其代谢产物，多技术联用和多信息融合能综合评价果蔬劣变。以各种传感器为感知节点构建物联网监测系统，进而实现果蔬品质劣变信息的智能化实时监测，为解决果蔬加工过程中品质劣变控制技术难题提供参考，对降低果蔬产后的经济损失，推进果蔬产业可持续发展具有重要意义。

关键词：智能感知；无损检测；品质劣变；物联网；机器视觉；高光谱；近红外；拉曼光谱；电子鼻

中图分类号：TP241.3　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**202106-SA011

引用格式：郭志明, 王郡艺, 宋烨, 邹小波, 蔡健荣. 果蔬品质劣变传感检测与监测技术研究进展[J]. 智慧农业(中英文), 2021, 3(4): 14-28.

GUO Zhiming, WANG Junyi, SONG Ye, ZOU Xiaobo, CAI Jianrong. Research progress of sensing detection and monitoring technology for fruit and vegetable quality control[J]. Smart Agriculture, 2021, 3(4): 14-28. (in Chinese with English abstract)

1　引　言

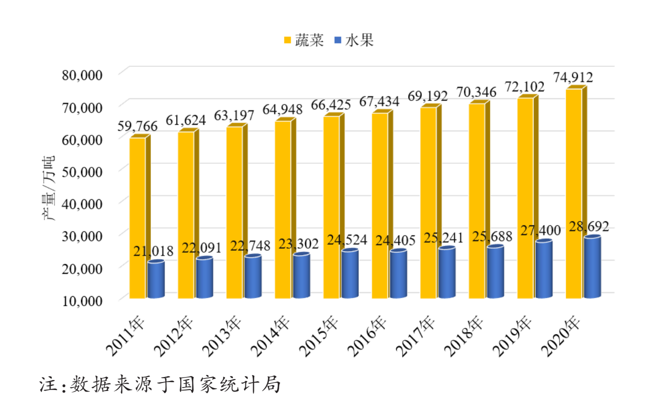
联合国粮食及农业组织将2021年设为“国际果蔬年”，旨在突出水果和蔬菜在人类营养、食品安全、可持续生产以及减少浪费中的重要作用；呼吁通过技术创新推动健康、可持续的果蔬生产，减少损失和浪费[1]。中国蔬菜水果总面积及总产量一直稳居世界第一，是继粮食之后的第二、三大农业种植产业[2]，是国内外市场前景广阔且具有较强国际竞争力的优势农业产业，也是许多地区经济发展的亮点和农民致富的支柱产业之一。2011—2020年中国蔬菜和水果产量如图1所示，均保持稳步增长态势。果蔬产业是农业的重要组成部分，其发展可促进农业结构调整、优化居民饮食结构、增加农民收入。提供丰富、新鲜、营养健康的果蔬产品是满足人民对美好生活向往的物质基础。

表面缺陷、机械损伤、微生物侵染、病害等是导致采后果蔬品质劣变的主要因素[3]。表面缺

收稿日期：2021-06-30　修订日期：2021-07-13

基金项目：国家重点研发计划项目（2017YFC1600802）；国家自然科学基金项目（31972151）；济南市“高校20条”资助项目（2020GXRC028）；江苏省重点研发计划项目（BE2019359）

*通信作者：郭志明（1982—），男，博士，教授，博士生导师，研究方向为农产品品质安全无损检测。电话：0511-88780201。E-mail：guozhiming@ujs.edu.cn。



注：数据来源于国家统计局

图1　2011—2020年中国蔬菜和水果产量

Fig. 1 Vegetable and fruit production of China from 2011 to 2020

陷是指果蔬生长过程中由于大风、冰雹等外界原因导致表面擦伤或磕碰而又愈合产生的疤痕等，极大影响果蔬经济价值。在采收和运输环节，果蔬易受到物理损伤，微生物借此通道进入果蔬内部，造成果蔬的腐败和病害。中国80%～90%的果蔬收获后直接进入超市和菜市场，因此对果蔬货架期品质控制具有较高要求[4]。欧美日本等发达国家，95%以上农产品进入冷链物流，据不完全统计，仅在运输环节，中国果蔬每年损失约700亿元[5,6]。

随着经济的发展和人民生活水平的提高，消费者对果蔬质量和安全性要求越来越高。2021年3月发布的《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》中明确指出，“要强化全过程农产品质量安全监管，加强农产品仓储保鲜和冷链物流设施建设；深入实施食品安全战略，加强食品全链条质量安全监管”。当今中国果蔬产业已经跨过了“扩大生产规模的产业阶段”，进入了提高品质、控制成本、转变模式的品牌培育、品牌销售、推行品牌战略的发展阶段。果蔬产业的发展迫切需要采后商品化处理技术，特别是品质劣变监测技术。中国是果蔬最大生产国和消费国，巨大的产品检测需求、国内产业需求和食品安全的严峻挑战都迫切需要研究适用于果蔬劣变的监测技术，从而保障果蔬产业的健康发展。

2　技术研究现状及发展分析

果蔬属于生鲜类食品，其采收销售过程中仍然进行着新陈代谢，如果贮藏不当，就会发生劣变，其一般表现为果蔬表面颜色改变、气味发生变化、硬度下降、失水萎蔫等，通过人眼可以判断品质发生严重劣变的果蔬，但是人眼易受生理条件和主观因素的影响，检测范围有限，检测结果可靠性差。

在果蔬品质劣变研究领域，研究人员利用光、声、电等特性，形成了如机器视觉、电子鼻、近红外光谱、高光谱成像检测等一系列新兴的传感检测技术，如图2所示。通过传感器获取相关信号和图谱并进行判别分析，具有快速、易操作、对样品无破坏性等优点。将多种技术联合使用，多维度获取果蔬品质信息，可以提升品质劣变检测、监测的稳定性和准确率。

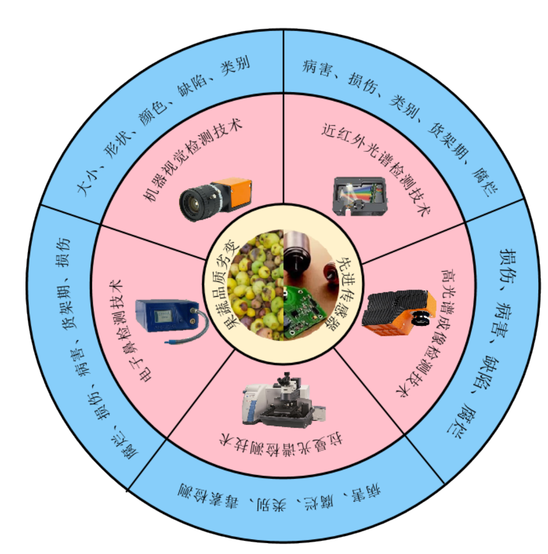


图2　果蔬品质劣变主要传感检测技术及评价指标

Fig. 2 Fruit and vegetable quality deterioration sensing technology and evaluation detection indicators

2.1　感官仿生检测技术

感官仿生技术是利用信息传感技术模仿人或动物的视觉、听觉、味觉和嗅觉等感觉，获取被检测对象的特征信息，并用计算机模拟人脑对所获取的信息进行处理，检测效率高，检测结果准确[7]。目前在果蔬品质劣变检测领域主要有机器

视觉技术和电子鼻技术[8]。

2.1.1 机器视觉检测技术

机器视觉技术使用图像获取设备模拟人类视觉获取检测对象的特征信息，输送至计算机进行图像处理、对目标区域进行分析和识别，从而实现对被检测对象的综合评价[9]，具有非接触性、识别速度快、判别精度高等优点，在果蔬检测领域多用于品质分级和缺陷检测[10]。

在蔬菜品质检测方面，da Costa等[11]使用机器视觉技术对西红柿外部图像进行获取，并通过深度神经网络二元分类器对图像进行分类，判别准确率达94.6%。Su等[12]使用深度相机采集了马铃薯的深度图像用于检测马铃薯畸形，判别准确率可达90%。Xie等[13]使用机器视觉提取胡萝卜表面缺陷，如绿肩、弯曲、表面开裂等关键参数，分别建立识别算法，缺陷总识别率达90.9%。谢为俊等[14]提出了集胡萝卜表面缺陷识别和开裂区域分割的融合网络，结合支持向量机（Support Vector Machine，SVM）和集成算法提高识别模型的准确率，能准确识别胡萝卜的表面缺陷类别并提取胡萝卜开裂区域。

在水果缺陷检测方面，高辉等[15]采用亮度自动校正技术结合加权矢量机，通过多重判断实现基于机器视觉的苹果缺陷检测，总体判别正确率可达99.1%。张明等[16]提出了基于区域亮度自适应校正的表面缺陷检测算法，以纽荷尔脐橙为对象，对溃疡病果、介壳虫果、风伤果等8种表面缺陷果进行判别，整体缺陷识别率达95.8%。Bhargava和Bansal[17]建立了苹果分级系统，通过图像分割和提取，分别使用最近邻法（K-Nearest Neighbor，KNN）、稀疏表示分类器（Sparse Representation based Classification，SRC）和SVM三种分类器，其中SVM分类器性能最优，可实现缺陷苹果的剔除。Fan等[18]利用计算机视觉结合卷积神经网络（Convolutional Neural Networks，CNN）建立了苹果缺陷检测模型，独立验证集的缺陷识别率为92%。刘浩等[19]设计了基于机器视觉的马铃薯缺陷检测系统，采用RGB彩色模型对马铃薯图像R、G、B分量进行分析，将有无缺陷部位进行分割，对虫眼、龟裂、绿皮和腐烂等缺陷有较高的判别正确率。

目前机器视觉技术已经广泛应用于果蔬外部品质检测，但果蔬不同于机械加工的标准品，其在生长过程中会受光照、海拔、叶面遮挡等因素的影响，严重干扰被检测对象的图像获取工作，极易造成误判。随着人工智能和深度学习的发展，新的识别算法可以提高机器视觉检测的适用性和稳定性。

2.1.2 电子鼻检测技术

电子鼻是通过模拟人或动物的鼻子，对被检测对象的挥发性成分进行获取、分析、识别的新型仿生仪器[20]。果蔬中的风味物质是由不同挥发性成分如醇类、醛类、酮类等组成的混合物，可以客观反映果蔬品质特征，通过对其响应谱进行分析可以实现对果蔬新鲜度、腐烂度、损伤和病害判别。

利用电子鼻对果蔬腐烂监测进行了广泛研究。黄星奕等[21]利用电子鼻技术对果蔬真菌腐烂进行了研究，建立了KNN判别模型，训练集与预测集识别率分别为90%和85%，可以实现果蔬劣变程度区分。Cincina等[22]将不同微生物接种于罐装去皮的番茄中，发现电子鼻能够检测腐败劣变的番茄。丁庆行等[23]基于电子鼻技术构建了仓储环境的水果腐烂无损检测系统，实现了4种核果类水果的轻微和严重腐败两种等级判别。朱丹实等[24]以华富苹果为对象，利用电子鼻分析苹果在1个月的贮藏期内风味物质变化，利用主成分分析（Principal Components Analysis，PCA）和线性判别分析（Linear Discriminant Analysis，LDA）对不同贮藏时间的苹果进行区分。张建超等[25]利用电子鼻技术对苹果霉心病特征挥发性香气进行表征，利用Fisher、KNN等判别方法建立霉心苹果判别模型，预测集最优判别率达88.46%。杨晨昱等[26]利用近红外光谱技术和电子鼻技术分别结合Fisher判别、KNN等方法建立判别模型，电子鼻集合多层神经网络

（Multi-layer Neural Network，MLP）模型对霉心苹果判别效果最好，验证集正确判别率达86.2%。Guo等[27]利用电子鼻采集储藏过程的苹果信息，通过不同分析方法建立不同程度的腐败苹果分类模型，同时使用波长提取算法建立偏最小二乘（Partial Least-square Method，PLS）模型预测斑块区域，结果表明PCA降维后的偏最小二乘判别（Partial Least-squares Discrimination Analysis，PLS-DA）模型具有最佳分类表现，竞争性自适应重加权采样偏最小二乘（Competitive Adaptive Reweighted Algorithm-Partial Least Square，CARS-PLS）模型对变质面积检测性能最好。赵策等[28]采用PEN3电子鼻将皇冠梨按三个腐败等级对黑核梨样本进行采样，利用PCA等不同分类方法相结合建立判别模型，最佳准确率可达95.6%。

在果蔬品质检测方面，马蒙蒙等[29]以不同品种的富士苹果为研究对象，利用电子鼻对其货架期间的香气成分进行获取并建立线性判别模型。Hao和Yu[30]使用金属氧化物半导体电子鼻对梨气味数据进行收集，PCA降维后分别使用BP神经网路（Back Propagation Neural Network，BPNN）和极限学习机（Extreme Learning Machine，ELM）对梨的棕色芯进行检测，其精度为0.9683。Yang等[31]使用电子鼻采集黄桃挥发性物质，实现24 h内黄桃损伤水平及损后时间精准预测，识别损伤果的正确率为93.33%。Nouri等[32]对60个石榴样本分别使用LDA、BPNN和SVM等方法进行比较判别，其中LDA仅使用两个MOS传感器就以100%准确度检测出患真菌病的石榴。Jia等[33]使用PEN3电子鼻采集接种/未接种青霉菌苹果和混合苹果，分别使用LDA、BPNN、SVM和径向基函数神经网络（Radial Basis Function Neural Network，RBFNN）等四种模式识别算法建立了新鲜/发霉苹果的预测模型。

国内现阶段的电子鼻系统装置所用气敏传感器多为国外进口，成本较高，目前多用于科研院所及高校[34]。在传感器方面，需提高传感器电极膜材料的性能，提升其灵敏度和耐用性[35]。此外，建立判别模型多使用PCA、LDA、PLS等经典方法，可对已有算法进行优化改进提高判别准确率，同时探索新的模式识别算法。

2.2 光谱和成像检测技术

由于果蔬的劣变组织和正常组织特性不同，在不同波长光线照射下会有不同的吸收、反射和透射特性，即果蔬的光谱反射率或吸收率在某一段或者几段特定波长内出现峰值，根据特征峰值与果蔬的品质劣变指标建立关系，进而判别果蔬劣变[36]。果蔬内部品质光电检测技术在生产过程中具有快速、高效、精确的检测和监控优势。随着光机电技术和制造工艺的发展，光谱仪向小型化、专用化、低成本、便携化方向升级，为果蔬品质的实时原位检测和评价提供了技术支撑。近红外光谱检测技术、高光谱成像检测技术和拉曼光谱检测技术是常见的果蔬品质劣变光谱检测技术。特别是近红外光谱检测技术，中国正处在从实验室研究向生产应用的关键转型期。实验室研究级近红外光谱仪检测精度高、稳定性好，但体积大、携带不便，价格昂贵，限制了其在农产品各流通环节的应用和推广。

2.2.1 近红外光谱检测技术

近红外光主要是含氢基团*X*-H振动的倍频与和频吸收，分子振动从基态到高能级跃迁产生光谱，其中包含有机化合物的组成和分子结构信息[37]。近红外光谱检测技术是目前最常用的果蔬内部品质无损检测技术[38]。

前期采用近红外光谱检测技术对水果品质检测开展了广泛研究，王梓萌等[39]以斗南苹果为对象采集其4000～12,500 cm^{-1}波长内的漫反射光谱，利用PCA降维后分别使用马氏距离和Fisher判别建立苹果霉心病检测模型，马氏距离判别模型效果较好，其判别正确率达97.14%。Xing等[40]利用400～1700 nm的可见和近红外反射光谱对“金美味”苹果表面的损伤进行了鉴别，其中545和1200 nm附近的波段可反映损伤组织随时间的变化情况，通过判别分析，总体分类正确

率大于90%。孟庆龙等[41]利用高光谱图像采集技术获取正常苹果和表面有缺陷苹果的高光谱图像，通过多元散射校正（Multiplicative Scatter Correction，MSC）预处理和PCA降维，建立PLS-DA模型，训练集和预测集的识别率达100%。刘燕德等[42]比较黄桃样品损伤前后的近红外漫透射光谱，建立支持向量机-偏最小二乘（Support Vector Machine-Partial Least-square Method，SVM-PLS）模型，实现黄桃表面缺陷的在线检测，表面缺陷果的判别正确率为100%。Tian等[43]设计了在线近红外测量系统，从三个方向对苹果光谱进行采集，使用SVM开发补偿模型，用于检测苹果霉心病，全体SVM模型在三个方向的识别精度都是100%。Perez-Marin等[44]研究了近红外光谱技术作为一种无损分析技术的可行性，并将其应用于建立冷藏柑桔的质量标准和采后货架期，建立了平均分和相应的控制限作为预警系统。Jlab等[45]将可见-近红外波段进行分段主体组件分析，提取7个波长图像作为构建多光谱PC图像，对水果衰变区域进行分割，以检测橙子的早期衰变。Guo等[46]采集水心病苹果的近红外光谱，比较不同变量选择算法优选特征波长以简化模型，CARS-PLS的苹果水心度定量检测模型的相关系数达0.9808。

针对蔬菜品质劣变检测，韩亚芬等[47]利用近红外光谱透射技术分别采集健康和黑心病马铃薯光谱数据，利用PCA选择特征波长建立PLS-DA模型，实现了对马铃薯内部缺陷快速无损检测。Nishino等[48]开发了一种双光束系统，通过在两个方向测量洋葱的透射光谱。基于偏最小二乘回归（Partial Least Squares Regression，PLSR）模型预测的腐烂评分的二元分类表明，对于不同程度的洋葱鳞茎腐烂都取得了较好的检测结果。Imanian等[49]分别利用可见光、近红外、短波红外光谱仪分别获取马铃薯光谱数据，使用神经网络元胞自动机挑选波长后利用LDA和KNN等组合方法结合多数投票规则对健康和缺陷马铃薯进行区分，使用LDA获得最优性能，其准确率达97.7%。Han等[50]为马铃薯检测构建了可见/近红外传输光谱平台，分析健康和黑心马铃薯的光谱传输特征，PCA降维后建立PLS-DA判别模型，结果表明黑心马铃薯光谱曲线相对平稳无明显吸收峰，模型总精度达96.73%。

国外关于近红外光谱技术的研究起步较早，迅速从实验室研究走向产品化应用，但依旧存在一些问题，如实时测试方案和测试部位的合理设计，光谱信号的有效提取，稳定有效的去噪、处理、预测和补偿模型的建立，检测精度和速度的保证，水果尺寸差异、位姿差异、温度变化的影响等。尽管商业化仪器已经相继推出并应用，但其准确性和精度仍有待科学验证[51]。相对于国外的进展，中国对水果内部品质在线检测的研究起步较晚，目前仍处于试验研发阶段，技术不成熟，缺乏自主知识产权的装备投放市场，虽然针对上述问题提出了各种解决方案和补偿算法，并申请了一系列专利，但在实用化过程中仍然存在很多关键问题需要进一步解决。

2.2.2 高光谱成像检测技术

多光谱技术能同时获得多个光学频谱波段信息，高光谱成像技术是集图像信息和光谱信息于一体的无损检测技术，可以获得更复杂的指纹特征，其图像信息可以反映机器视觉难以检测的早期腐烂等外部损伤特征，光谱信息可以反映被测样本的内部组分信息，能从多个维度反映果蔬的内外部品质信息[52]。

以苹果为对象，黄文倩等[53]为确定苹果早期轻微损伤检测的有效波长，对损伤发生仅为半小时的苹果进行损伤检测研究，利用有效波长和全局阈值理论开发了多光谱轻微损伤提取算法，整体检测精度可达98%。沈宇等[54]分别采集完好和轻微损伤后不同时间的高光谱图像，进行特征波长提取后建立基于遗传算法优化的BPNN和SVM判别模型。结果表明，811 nm波段的SVM模型为最佳判别模型，识别率达90.63%。Baranowski等[55]综合运用高光谱成像和热成像技术检测苹果损伤。分析了苹果组织损伤后两周的

可见光、近红外和短波红外光谱特征。采用SVM、线性Logistic回归、神经网络和决策树等有监督分类方法，对5个苹果品种的损伤后时间判别进行了比较。对二阶导数预处理后的光谱数据进行分类，其预测精度达到90%以上。Park等[56]使用PLSR、PCA和LDA对健康、无症状和有症状的苹果叶进行分类以实现苹果真菌疾病的检测，LDA预测模型准确度达88%。

在其他果蔬品质检测方面，董建伟等[57]提出了基于多光谱成像的库尔勒香梨表面缺陷检测和缺陷面积计算方法，并研究了疤痕、病害、果锈等6种表面缺陷情况，通过统计像素个数代替面积实现缺陷面积计算，判别准确率达92%以上。Pan等[58]将交链格孢霉接种至库尔勒梨，并从感染和对照样品中获取高光谱图像，进行光谱角映射以从健全组织中分割感染区域，并监测疾病的发病过程。建立了SVM判别模型，总体准确率达97.5%。吴姝等[59]利用高光谱成像系统采集冬枣在不同损伤时期的高光谱图像，对其表面微观损伤至内部隐性损伤的渐变光谱进行研究，选取了12个波长建立PLS-DA模型，检测精度达86.7%。武锦龙等[60]使用高光谱技术获取轻微损伤油桃原始图像，使用图像分割算法将油桃与背景分离后使用分块算法对图像分块并添加标签，建立CNN判别模型，识别率达88.2%。Huang等[61]利用高光谱成像对蓝莓图像进行获取，通过光谱相关性分析以选择有效光谱范围并建立PLS-DA判别模型，实现蓝莓早期疾病的快速检测。Pham和Liou[62]开发了一种用于研究圆形水果的旋转高光谱成像系统用于表面缺陷检测，以枣为实验对象，利用高光谱数据对锈斑、裂纹等6种枣皮进行分类，使用SVM和人工神经网络（Artificial Neural Network，ANN）模型区分，分类准确率分别达97.3%和7.4%。赵明富等[63]利用高光谱相机分别获取发芽、腐烂、黑心等马铃薯高光谱图像，利用PCA降维并通过图像处理方法提取特征图像，利用改进的贝叶斯分类器进行识别，预测集识别率达95%以上。

高光谱成像技术将光谱和图像集为一体，实现被测物质的可视化，既可以实现轻微损伤和小面积缺陷的检测，也可同时检测果蔬内部品质及成分分布情况，在果蔬内外品质检测方面优势显著。但目前高光谱成像设备价格昂贵且体积巨大，并不适合大规模推广应用[37]。此外，高光谱图像采集的数据量较大，数据处理时间长，对于系统硬件有较高的要求。在优化特征波长提取算法的基础上开发低成本、专用型多光谱成像系统，在果蔬品质劣变过程的动态监测方面具有广阔的应用潜力。

2.2.3 拉曼光谱检测技术

拉曼光谱是一种基于拉曼散射的新兴激光技术，通过分子振动、转动获得结构等相关信息[64]，对拉曼峰位置、强度、线型和谱线数目等的分析即可实现对样品的定量定性分析[65,66]。拉曼光谱可以与近红外光谱互补，对近红外光谱捕捉不到的信息进行检测[67]。陈思雨等[68]使用拉曼光谱仪采集苹果光谱，用自适应迭代重加权惩罚最小二乘算法进行基线校正建立SVM分类判别模型，可以实现苹果早期轻微损伤的快速识别。刘燕德、代芬和Sanchez等使用拉曼光谱对柑橘黄龙病检测进行了研究，其中刘燕德等[69]获取了柑橘叶片拉曼光谱并通过聚合酶链式反应（Polymerase Chain Reaction，PCR）鉴别分为轻度、中度、重度、营养素缺乏和正常5类，使用2次多项式拟合的PLS-DA模型预测效果最好，预测相关系数达0.98。代芬等[70]分析比较了黄龙病柑橘样本和健康样本的自荧光和拉曼光谱差异，结合PLS-DA判别模型和ROC曲线分析，拉曼光谱的判断效果最优，鉴别准确率达98.17%。Sanchez等[71]使用手持式拉曼光谱仪与化学计量学方法相结合检测和识别柑橘黄龙病，并可以准确区分健康树、无症状树、枯萎病树和溃疡病树。Lin等[72]确定了具有不同症状水平的香蕉枯萎病菌和香蕉枯萎病菌感染的香蕉假茎的拉曼指纹，以区分感染香蕉和健康香蕉。Guo等[73]选取易造成苹果腐败的5种腐败真菌并开发了基于

金纳米棒基底方法的表面增强拉曼光谱来收集和检查主要苹果腐败真菌孢子的拉曼指纹，建立的PCA-LDA模型判别准确率达到了98.31%。

近年来，随着拉曼光谱研究的不断深入，拉曼光谱已成为农产品质量安全检测领域发展最快的技术之一。已有研究表明拉曼光谱在果蔬疾病诊断、致腐菌识别和果蔬真菌毒素污染检测方面是可行的。但由于缺乏高效的拉曼光谱增强基底和精确的拉曼图谱库及检测方案，拉曼光谱增强基底的制备方法和拉曼标准谱图数据库的建立亟待完善[74]。随着仪器设备的不断开发，标准的建立较为滞后，未来需要加快行业相关标准的制定。

2.3 多技术联用和多信息融合检测果蔬劣变研究现状

果蔬劣变无损检测/监测方法各有优劣，机器视觉技术通过对果蔬的检测可以很好地识别劣变果蔬，但是对于外部特征不明显的缺陷，如内部损伤的检测则并不适用，且机器视觉技术的图像分析主要依赖于算法的改进，在复杂的多样性环境中抗干扰性差，从而影响其运算速度和准确性[75,76]；电子鼻技术通过对果蔬的挥发性气体成分进行检测，具有响应时间短、重复性好、操作简单等特点，可利用采集到的气味指纹图谱对未知样品进行识别[77]，但是果蔬挥发性气体成分的产生易受环境条件影响，产生的气体成分种类多、不稳定，需要解析出特征性气体响应信号，针对特定气体建立判别模型[78]；光谱技术可以深入果蔬组织内部，检测果蔬的糖度、硬度、叶绿素含量等品质指标，定量分析和评估果蔬的劣变程度，但是目前果蔬劣变检测研究多是针对单一品质的研究，而对多指标同步检测及综合品质分级的研究相对较少，且由于果蔬是非均匀组织，光在组织中的传播受多种因素的影响，目前对光在组织中的传播特性，光与果蔬组织的相互作用机理缺乏足够的认识，建立的果蔬劣变检测模型易受外界环境影响，稳定性差[79]；而多技术联用和多信息融合技术能够将多个检测指标结合在一起，同时获取样品来自多传感器或多源的信息和数据[80]，在一定的准则下加以自动分析和综合，不仅能对样品内部品质进行检测，还能检测其外部品质，综合评价果蔬的品质劣变情况，具有较大的应用潜力。

袁瑞瑞等[81]利用近红外高光谱成像技术对定量损伤分级的灵武长枣进行光谱采集，提取感兴趣区域并计算平均光谱值，优选预处理和特征波长提取算法建立PLS-DA判别模型，可以实现灵武长枣损伤等级的快速判别。Yuan等[82]采用可见近红外高光谱成像系统采集机械损伤后5个时间点的光谱数据，优选预处理和特征变量选择方法，建立PLS-DA判别模型，经过导数处理的CARS-PLS-DA模型效果最优，检出准确率为100%。部分学者对菠菜腐烂前新鲜度进行检测。Huang等[83]基于机器视觉和电子鼻的多传感器数据融合方法智能检测了菠菜腐烂前新鲜度等级。其中基于机器视觉的BPNN和KNN模型的分类准确率为85.42%，基于电子鼻的BPNN模型的分类精度分别为81.25%和75.00%，而基于多传感器数据融合的BPNN模型大大提高了菠菜新鲜度的检测精度，分类准确率达93.75%。徐海霞[84]将基于机器视觉和电子鼻技术的融合方法应用于菠菜新鲜度的检测，提出将不同检测技术获得的特征值进行融合的方法，建立BPNN模型用于菠菜新鲜度的等级判别，训练集和预测集判别率分别为97.92%和93.75%。陈乾辉和吴德刚[85]提出了基于图像融合的苹果缺陷检测算法，该算法利用可见光和红外图像的高、低频小波系数采用不同的融合方法，以获得更加突出的特征图像。该方法在划碰伤、果梗／花萼、完好果的苹果果实检测方面平均识别率可达96%，且在划碰伤方面识别率可达92%。Liu等[86]将高光谱成像和电子鼻相结合，使用PCA降维后提取草莓特色信息，开发定量模型以预测草莓腐烂过程中微生物含量和质量属性，基于特色信息融合的模型比单个数据集（HIS或E-nose）构建模型具有

更好的预测性能。预测集相关系数可达0.925。

相比于单一传感检测技术，多技术联用和多信息融合检测可获得更全面的信息，检测结果更客观精准。通过光谱、图像、电子鼻等获取的传感信息，可模拟人的眼睛和鼻子等感觉器官，多维度融合评价果蔬劣变程度，克服单一传感信息解析的局限性，提高检测模型的鲁棒性和并行处理能力，可为果蔬品质劣变高精度检测和监测提供新途径。

2.4 果蔬品质劣变监测技术产业驱动发展分析

由于果蔬独特的生理性质，极易在由生产区向消费区转移过程中发生品质劣变，已有果蔬品质劣变检测方法已无法满足品质监测控制的要求。近年来随着物联网、云数据的兴起，将电子鼻、光谱仪等传感设备按照约定协议与网络相连接，实现水果品质劣变的远程检测和监测预警[87]，结合云服务器、云数据库等服务，建立远程模型共享服务平台，为模型的升级与维护提供远程服务。多技术联用结合物联网技术使获取的信息在数量和维度上实现突破，可以提高果蔬品质劣变检测的准确性[88,89]。

将电子鼻及温湿度传感器结合无线传感网络技术建立果蔬冷库监控系统，实现果蔬冷库的多维环境参数实时监控及精准调节，以实现减少果蔬腐败的目的[90]。以信息技术为基础，建立果蔬冷链物流实时监控系统，使用温湿度传感器监控物流温湿度状况，保证果蔬物流运输的稳定性[91]。

在果蔬种植阶段，使用便携式近红外无损检测设备长期监测树上果蔬内部品质属性的变化规律，反馈于监测系统，指导当地果蔬种植，提高果蔬群体的优质率；在果蔬入库阶段，将机器视觉、高光谱成像技术、近红外光谱检测技术等综合应用，对果蔬内外部品质进行多维检测，将腐烂、病害等异常果在入库前剔除，防止造成更大规模的果蔬品质劣变，并且对果蔬做初步分级，提高其附加值；在果蔬仓储和运输阶段，使用电子鼻技术对仓储库和运输货车中果蔬实时监测，通过全球定位系统（Global Positioning System，GPS）对仓储库和运输车进行定位，若监控信息出现异常，及时回传监测系统并通知管理人员进行处理。通过多技术联用和多信息融合实现果蔬品质劣变的监测与评价。

3 果蔬品质劣变智能监测技术瓶颈问题与发展趋势

3.1 研究技术瓶颈分析

果蔬品质劣变检测技术各有优缺点，在进行多技术联用和多信息融合检测果蔬劣变研究的同时，要注重各项技术在实际应用中的机理研究、数据融合和算法优化以确保检测的准确度。另外，果蔬受品种、生长环境、果园管理模式、产地等的影响，其个体间差异较大，因此要选取具有代表性的样本进行模型建立，并对模型传递和更新做进一步的研究，以满足实际推广应用的要求。网络技术、传感器、云计算、5G通信等技术日新月异，应用于农业生产管理及经营领域将是必然趋势，将提高农产品的附加值，推动了智慧农业建设的发展。但是，受传感技术、通讯技术等的限制，果蔬品质检测技术在推广应用方面尚存在以下问题。

（1）传感器价格昂贵。电子鼻、光谱仪等作为物联网必不可少的传感器，目前多用于科研。部分传感器需从国外进口，价格昂贵且售后服务不便。为降低传感器成本，应加大关键部件的研发力度，通过创制果蔬专用型传感器件，如光谱仪优选特征窄波段光电传感器、电子鼻筛选特征气体传感器，在此基础上进行集成创新，研制小型化、低成本的传感器产品。

（2）果蔬仓储库布局标准化程度有待提高。中国的果蔬仓储库规模和布局存在差异，对于果蔬品质劣变监测系统的改造存在困难。仓储库标准化是实现果蔬品质劣变监测的重要前提，通过

制修订生鲜农产品冷链流通规范标准，驱动从果蔬出入库分级系统布置、传感器监测节点设置、数据传输系统搭建等方面建立标准化体系，可节约资源与成本。

（3）仓储库网络通信亟待升级。果蔬仓储库一般建于郊区，其物联网无线通信易受植被等环境影响。此外，仓储库内GPS等信号易被屏蔽，因此需要研究低功耗、低成本的农业物联网自组网通信协议。另一方面，随着果蔬冷链流通产业的规模化、集约化发展，果蔬龙头企业信息化和智能化发展的内在驱动，软硬件条件（包括网络通讯）升级改造势在必行。

3.2 研究发展趋势

果蔬品质劣变物联网监测是智慧农业的重要组成部分。随着科技不断进步，小型化、低成本、低功耗的传感器不断研发，与大数据、云计算深度融合，科学高效的数据整理与分析为农业管理人员提供有力支撑，指导果蔬园艺种植规范，从整体上提高果蔬群体的优质率，并对采后加工与运输过程中的果蔬品质劣变实现监测，突破农业生产自身限制，推动农业信息化和智能化发展。

果蔬贮运信息的多源耦合性和品质参数的多样性及供应链信息的不对称性，阻碍了果蔬品质监测感知技术的发展应用。未来可围绕果蔬贮运信息感知、品质信息耦合和动态数据反馈三个核心感知环节，研究果蔬品质劣变监测传感节点的组网方法，研究信息采集方法和数据的生成、传输与管理方法，以数据溯源为底层架构实现果蔬传感信息的高效、可靠反馈，以智能手机或远程服务器为互通互联监测平台，研发果蔬品质劣变的智能化实时监测的物联感知与数据处理设备，实现果蔬品质劣变信息的智能化实时监测。随着向果蔬规模化、集约化生产模式的转变，农业龙头企业对果蔬产后减损增效的技术需求迫切，果蔬品质劣变传感监测技术将具有广阔的应用前景。

参考文献：

[1] 联合国粮农组织启动联合国.2021国际果蔬年[EB/OL][2021-06-30]. https://www. fao. org/fruits-vegetables-2021/zh/.

[2] 邹攀, 白雪, 陈秋生, 等. 无损检测技术在果蔬品质评价中应用的研究进展[J]. 安徽农业科学, 2021, 49(2): 1-4.
ZOU P, BAI X, CHEN Q, et al, Research progress on the application of non-destructive testing technology in fruits and vegetables quality evaluation[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2021, 49(2): 1-4.

[3] 刘妍, 周新奇, 俞晓峰, 等. 无损检测技术在果蔬品质检测中的应用研究进展[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2020, 46(1): 27-37.
LIU Y, ZHOU X, YU X, et al. Research progress of nondestructive testing techniques for fruit and vegetable quality[J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences), 2020, 46(1): 27-37.

[4] 苑进. 选择性收获机器人技术研究进展与分析[J]. 农业机械学报, 2020, 51(9): 1-17.
YUAN J. Research progress analysis of robotics selective harvesting technologies[J]. Transactions of the CSAM, 2020, 51(9): 1-17.

[5] 韩志辉. 基于产业价值角度的蔬菜品牌提升之道[J]. 蔬菜, 2017(11): 1-6.
HAN Z. The way to improve vegetable brand based on the perspective of industrial value[J]. Vegetables, 2017 (11): 1-6.

[6] 张雯丽. "一带一路"战略下我国农业对外合作选择[J]. 农村工作通讯, 2017(5): 52.
ZHANG W. Agricultural foreign cooperation options of country under the "One Belt One Road" strategy[J]. Rural Work Newsletter, 2017(5): 52.

[7] 王顺, 黄星奕, 吕日琴, 等. 水果品质无损检测方法研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2018, 44(11): 319-324.
WANG S, HUANG X, LYU R, et al. Research progress of nondestructive detection methods in fruit quality[J]. Food and Fermentation Industries, 2018, 44(11): 319-324.

[8] 穆渴心, 蔡俊, 刘枣, 等. 现代无损检测技术在农产品真菌与真菌毒素侵染中的应用[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(8): 123-128.
MU K, CAI J, LIU Z, et al. Modern non-destructive detection of fungal and mycotoxin infection in agricultural products[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2021, 36(8): 123-128.

[9] 卢军党, 刘东琴, 田智辉. 机器视觉技术在核桃分级检测中的应用[J]. 农产品加工, 2020(20): 106-107.

LU J, LIU D, TIAN Z. Application of machine vision technology in walnut grading detection[J]. Agricultural Products Processing, 2020(20): 106-107.

[10] 陈涛 . 计算机视觉技术在农产品品质检测中的应用[J]. 安徽农学通报, 2019, 25(20): 110-113.
CHEN T. The application of computer vision technology for food quality inspection of agricultural products[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2019, 25 (20): 110-113.

[11] DA COSTA A Z, FIGUEROA H E H, FRACAROLLI J A. Computer vision based detection of external defects on tomatoes using deep learning[J]. Biosystems Engineering, 2020, 190: 131-144.

[12] SU Q, NAOSHI K, LI M, et al. Potato quality grading based on machine vision and 3D shape analysis[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 152: 261-268.

[13] XIE W, WANG F, YANG D. Research on carrot surface defect detection methods based on machine vision[J]. IFAC-PapersOnLine, 2019, 52(30): 24-29.

[14] 谢为俊, 魏硕, 王凤贺, 等 . 基于机器视觉的胡萝卜表面缺陷识别方法研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51 (S1): 450-456.
XIE W, WEI S, WANG F, et al. Machine vision based defect method of carrot external defects[J]. Transactions of the CSAM, 2020, 51(S1): 450-456.

[15] 高辉, 马国峰, 刘伟杰 . 基于机器视觉的苹果缺陷快速检测方法研究[J]. 食品与机械, 2020, 36(10): 125-129.
GAO H, MA G, LIU W. Research on a rapid detection of apple defects based on mechanical vision[J]. Food & Machinery, 2020, 36(10): 125-129.

[16] 张明, 王腾, 李鹏, 等 . 基于区域亮度自适应校正算法的脐橙表面缺陷检测[J]. 中国农业科学, 2020, 53 (12): 2360-2370.
ZHANG M, WANG T, LI P, et al. Surface defect detection of navel orange based on region adaptive brightness correction algorithm[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(12): 2360-2370.

[17] BHARGAVA A, BANSAL A. Quality evaluation of Mono & bi-Colored apples with computer vision and multispectral imaging[J]. Multimedia Tools and Applications, 2020, 79(11): 7857-7874.

[18] FAN S, LI J, ZHANG Y, et al. On line detection of defective apples using computer vision system combined with deep learning methods[J]. Journal of Food Engineering, 2020, 286: ID 110102.

[19] 刘浩, 贺福强, 李荣隆, 等 . 基于机器视觉的马铃薯自动分级与缺陷检测系统设计[J]. 农机化研究, 2022, 44(1): 73-78.
LIU H, HE F, LI R, et al. Design of potato automatic classification and defect detection system based on machine vision[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(1): 73-78

[20] 王俊, 崔绍庆, 陈新伟, 等 . 电子鼻传感技术与应用研究进展[J]. 农业机械学报, 2013, 44(11): 160-167.
WANG J, CUI S, CHEN X, et al. Advanced technology and new application in electronic nose[J]. Transactions of the CSAM, 2013, 44(11): 160-167.

[21] 黄星奕, 孙兆燕, 田潇瑜, 等 . 基于电子鼻技术的马铃薯真菌性腐烂病早期检测[J]. 食品工业科技, 2018, 39(24): 97-101.
HUANG X, SUN Z, TIAN X, et al. Early detection of potato rot disease caused by fungal based on electronic nose technology[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(24): 97-101.

[22] CONCINA I, FALASCONI M, GOBBI E, et al. Early detection of microbial contamination in processed tomatoes by electronic nose[J]. Food Control, 2009, 20 (10): 873-880.

[23] 丁庆行, 赵东杰, 刘军, 等 . 一种仓储环境水果腐烂监测的电子鼻系统[J]. 电子器件, 2019, 42(3): 781-787.
DING Q, ZHAO D, LIU J, et al. An electronic nose system for monitoring stored fruits decay[J]. Electronic Devices, 2019, 42(3): 781-787.

[24] 朱丹实, 任晓俊, 魏立威, 等 . 华富苹果常温贮藏过程中感官品质及挥发性风味物质变化[J]. 食品工业科技, 2019, 40(20): 278-284.
ZHU D, REN X, WEI L, et al. Changes of sensory quality and volatile compounds of Huafu apple preserved at room temperature[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(20): 278-284.

[25] 张建超, 张鹏, 薛友林, 等 . 基于电子鼻表征霉心病苹果特征气味及无损检测模型建立[J/OL]. 食品与发酵工业 : 1-10. [2021-06-28]. https://doi. org/10.13995/j. cnki.11-1802/ts.026717.
ZHANG J, ZHANG P, XUE Y, et al. Characterization of the characteristic odor and establishment of nondestructive detection model of core rot apple based on electronic nose[J/OL]. Food and fermentation industry: 1-10. [2021-06-28]. https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.026717.

[26] 杨晨昱, 袁鸿飞, 马惠玲, 等 . 基于FT-NIR和电子鼻技术的苹果霉心病无损检测[J/OL]. 食品与发酵工业 : 1-8. [2021-06-28]. https://doi. org/10.13995/j. cnki.11-1802/ts.025671.

YANG C, YUAN H, MA H, et al. Non-destructive detection of apple moldy core based on FT-NIR and electronic nose technology[J/OL]. Food and Fermentation Industry: 1-8. [2021-06-28]. https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.025671.

[27] GUO Z, GUO C, CHEN Q, et al. Classification for *Penicillium expansum* spoilage and defect in apples by electronic nose combined with chemometrics[J]. Sensors, 2020, 20(7): ID 2130.

[28] 赵策, 马飒飒, 张磊, 等. 基于电子鼻技术的皇冠梨腐败等级分类研究[J]. 食品工业科技, 2020, 41(3): 246-250.

ZHAO C, MA S, ZHANG L, et al. Research on classification of rotten grades of Huangguan pears on electronic nose technology[J]. Food Industry Science and Technology, 2020, 41(3): 246-250.

[29] 马蒙蒙, 程晨霞, 杨绍兰, 等. 富士系不同品种苹果货架期间品质特性分析[J]. 青岛农业大学学报(自然科学版), 2020, 37(2): 84-90.

MA M, CHENG C, YANG S, et al. Analysis of the fruit shelf life quality of different 'Fuji' apple cultivars[J]. Journal of Qingdao Agricultural University (Natural Science Edition), 2020, 37(2): 84-90.

[30] HAO W, YU G. A machine learning method for the detection of brown core in the Chinese pear variety Huangguan using a MOS-based e-nose[J]. Sensors, 20 (16): ID 4499.

[31] YANG X, CHEN J, JIA L, et al. Rapid and non-destructive detection of compression damage of yellow peach using an electronic nose and chemometrics[J]. Sensors, 2020, 20(7): ID 1866.

[32] NOURI B, MOHTASEBI S, RAFIEE S. Quality detection of pomegranate fruit infected with fungal disease[J]. International Journal of Food Properties, 2020, 23(1): 9-21.

[33] JIA W, LIANG G, TIANH, et al. Electronic nose-based technique for rapid detection and recognition of moldy apples[J]. Sensors, 2019, 19(7): ID 1526.

[34] 钱丽丽, 于果, 迟晓星, 等. 农产品产地溯源技术研究进展[J]. 食品工业, 2018, 39(1): 246-249.

QIAN L, YU G, CHI X, et al. Research progress of origin traceability of agricultural products[J]. Food Industry, 2018, 39(1): 246-249.

[35] 刘洋, 贾文珅, 马洁, 等. 电子鼻技术在肉与肉制品检测中的研究进展和应用展望[J/OL]. 智慧农业(中英文): 1-13. [2021-06-28]. http://kns. cnki. net/kcms/detail/10.1681.S.20210617.1102.002.html.

LIU Y, JIA W, MA J, et al. Research progress and application prospect of electronic nose technology in meat and meat products detection[J/OL]. Smart Agriculture: 1-13. [2021-06-28]. http://kns. cnki. net/kcms/detail/10.1681.S.20210617.1102.002.html.

[36] 刘燕德, 程梦杰, 郝勇. 光谱诊断技术及其在农产品质量检测中的应用[J]. 华东交通大学学报, 2018, 35 (4): 1-7.

LIU Y, CHENG M, HAO Y. Application of spectral diagnoses technology in determination of agricultural products quality[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2018, 35(4): 1-7.

[37] 胡逸磊, 姜洪喆, 周宏平, 等. 水果成熟度近红外光谱及高光谱成像无损检测研究进展[J]. 食品工业科技, 2021, 42(20): 377-383.

HU Y, JIANG H, ZHOU H, et al. Application of near-infrared spectroscopy and hyperspectral imaging technology to detect fruit maturity: A review[J]. Food Industry Science and Technology, 2021, 42(20): 377-383.

[38] 马佳佳, 王克强. 水果品质光学无损检测技术研究进展[J]. 食品工业科技, 2021, 42(23): 427-437.

MA J, WANG K. Research progress in optical nondestructive testing technology for fruit quality[J]. Food Industry Science and Technology, 2021, 42(23): 427-437.

[39] 王梓萌, 刘景艳, 姚腾飞, 等. 基于近红外光谱技术的苹果霉心病检测方法[J]. 科学技术与工程, 2019, 19 (10): 150-154.

WANG Z, LIU J, YAO T, et al. Detection method of moldy core in apple fruit based on near infrared spectroscopy[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(10): 150-154.

[40] XING J, BRAVO C, MOSHOU D, et al. Bruise detection on 'Golden Delicious' apples by vis/NIR spectroscopy[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2006, 52(1-2): 11-20.

[41] 孟庆龙, 张艳, 尚静. 基于高光谱成像技术无损检测苹果表面缺陷[J]. 食品工业, 2019, 40(3): 131-134.

MENG Q, ZHANG Y, SHANG J. Nondestructive detection of defect on apples using hyperspectral imaging technology[J]. Food Industry, 2019, 40(3): 131-134.

[42] 刘燕德, 吴明明, 孙旭东, 等. 黄桃表面缺陷和可溶性固形物光谱同时在线检测[J]. 农业工程学报, 2016, 32(6): 289-295.

LIU Y, WU M, SUN X, et al. Simultaneous detection of surface deficiency and soluble solids content for Amygdalus persica by online visible-near infrared transmittance spectroscopy[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(6): 289-295.

[43] TIAN S, ZHANG M, LI B, et al. Measurement orientation compensation and comparison of transmission spectroscopy for online detection of moldy apple core[J]. Infrared Physics & Technology, 2020, 111: ID 103510.
[44] PÉREZ-MARÍND, CALERO L, FEARN T, et al. A system using in situ NIRS sensors for the detection of product failing to meet quality standards and the prediction of optimal postharvest shelf-life in the case of oranges kept in cold storage[J]. Postharvest Biology & Technology, 2019, 147: 48-53.
[45] JLAB C, RZ A, JL A, et al. Detection of early decayed oranges based on multispectral principal component image combining both bi-dimensional empirical mode decomposition and watershed segmentation method[J]. Postharvest Biology and Technology, 158: ID 110986.
[46] GUO Z, WANG M, AGYEKUM A, et al. Quantitative detection of apple watercore and soluble solids content by near infrared transmittance spectroscopy[J]. Journal of Food Engineering, 2020, 279: ID 109955.
[47] 韩亚芬, 吕程序, 苑严伟, 等. PLS-DA优化模型的马铃薯黑心病可见近红外透射光谱检测[J]. 光谱学与光谱分析, 2021, 41(4): 1213-1219.
HAN Y, LYU C, YUAN Y, et al. PLS-discriminant analysis on potato blackheart disease based on VIS-NIR transmission spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2021, 41(4): 1213-1219.
[48] NISHINO M, KUROKI S, DEGUCHI Y, et al. Dual-beam spectral measurement improves accuracy of non-destructive identification of internal rot in onion bulbs[J]. Postharvest Biology and Technology, 2019, 156: ID 110935.
[49] IMANIAN K, POURDARBANI R, SABZI S, et al. Identification of internal defects in potato using spectroscopy and computational intelligence based on majority voting techniques[J]. Foods, 2021, 10(5): ID 982.
[50] HAN Y, LU C, YUAN Y, et al. PLS-discriminant analysis on potato blackheart disease based on VIS-NIR transmission spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2021, 41(4): 1213-1219.
[51] 郭志明, 郭闯, 王明明, 等. 果蔬品质安全近红外光谱无损检测研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(24): 8280-8288.
GUO Z, GUO C, WANG M, et al. Research advances in nondestructive detection of fruit and vegetable quality and safety by near infrared spectroscopy[J]. Journal of Food Safety Quality Inspection, 2019, 10(24): 8280-8288.
[52] 何馥娴, 蒙庆华, 唐柳, 等. 高光谱成像技术在水果品质检测中的研究进展[J]. 果树学报, 2021, 38(9): 1590-1599.
HE F, MENG Q, TANG L, et al. Research progress of hyperspectral imaging in fruit quality detection[J]. Journal of Fruit Science, 2021, 38(9): 1590-1599.
[53] 黄文倩, 陈立平, 李江波, 等. 基于高光谱成像的苹果轻微损伤检测有效波长选取[J]. 农业工程学报, 2013, 29(1): 272-277.
HUANG W, CHEN L, LI J, et al. Effective wavelengths determination for detection of slight bruises on apples based on hyperspectral imaging[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(1): 272-277.
[54] 沈宇, 房胜, 王风云, 等. 基于高光谱成像技术识别苹果轻微损伤的有效波段研究[J]. 中国农业科技导报, 2020, 22(3): 64-71.
SHEN Y, FANG S, WANG F, et al. Effective wavelengths study on the identification of slight bruises of apples based on hyperspectral imaging[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2020, 22(3): 64-71.
[55] BARANOWSKI P, MAZUREK W, WOZNIAK J, et al. Detection of early bruises in apples using hyperspectral data and thermal imaging[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 110(3): 345-355.
[56] PARK S H, HONG Y, SHUAIBU M, et al. Detection of *apple marssonina blotch* with PLSR, PCA, and LDA using outdoor hyperspectral imaging[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2020, 40(4): 319-324.
[57] 董建伟, 刘媛媛, 陈斐, 等. 基于多光谱图像的库尔勒香梨表面缺陷检测[J]. 农机化研究, 2021, 43(9): 35-40.
DONG J, LIU Y, CHEN F, et al. Surface defect detection of Korla pear based on multi-spectral image[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(9): 35-40.
[58] PAN T, CHYNGYZ E, SUN D, et al. Pathogenetic process monitoring and early detection of pear black spot disease caused by Alternaria alternata using hyperspectral imaging[J]. Postharvest Biology and Technology, 2019, 154: 96-104.
[59] 吴姝, 王琨, 王超. 基于光谱特性分析的冬枣渐变损伤研究[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(24): 191-194.
WU S, WANG K, WANG C. Study on the development of bruises on winter jujube based on spectrum characteristics analysis[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2020, 48(24): 191-194.
[60] 武锦龙, 苗荣慧, 黄锋华, 等. 高光谱图像与卷积神经网络相结合的油桃轻微损伤检测[J]. 山西农业大学

学报(自然科学版), 2019, 39(2): 79-85.
WU J, MIAO R, HUANG F, et al. Utilization of hyperspectral image coupled withconvolutional neural networkon nectarine slight bruises detection[J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition), 2019, 39(2): 79-85 .

[61] HUANG Y, WANG D, LIU Y, et al. Measurement of early disease blueberries based on Vis/NIR hyperspectral imaging system[J]. Sensors, 2020, 20(20): ID 5783.

[62] PHAM Q T , LIOU N S . Hyperspectral imaging system with rotation platform for investigation of jujube skin defects[J]. Applied Sciences-basel, 2020, 10(8): ID 2851.

[63] 赵明富, 刘自迪, 邹雪, 等. 基于高光谱成像技术对马铃薯外部缺陷的识别[J]. 激光杂志, 2016, 37(3): 20-24.
ZHAO M, LIU Z, ZOU X, et al. Detection of defects on potatoes by hyperspectral imaging technology[J]. Laser Journal, 2016, 37(3): 20-24.

[64] 王金灿. 果蔬农药残留快检的方法与应用[J]. 食品安全导刊, 2018(36): 69-70.
WANG J. Methods and application of quick inspection of pesticide residues in fruits and vegetables[J]. Food Safety Guide, 2018(36): 69-70.

[65] 王春和. 拉曼光谱技术在农产品质量安全检测中的应用[J]. 农业开发与装备, 2019(3): 79.
WANG C. The application of Raman spectroscopy in the quality and safety inspection of agricultural products[J]. Agricultural Development and Equipment, 2019(3): 79.

[66] 韩宇, 朱莉娅, 陈文, 等. 基于表面增强拉曼散射检测果蔬中农药残留的方法研究[J]. 食品工业科技, 2017, 38(19): 337-341.
HAN Y, ZHU L, CHEN W, et al. Study on the methods of detection of pesticides residue in fruits and vegetables based on surface enhanced Raman scattering[J]. Food Industry Science and Technology, 2017, 38(19): 337-341.

[67] 傅霞萍, 应义斌. 基于NIR和Raman光谱的果蔬质量检测研究进展与展望[J]. 农业机械学报, 2013, 44(8): 148-164.
FU X, YING Y. Application of NIR and Raman spectroscopy for quality and safety inspection of fruit and vegetables: A review[J]. Transactions of the CSAM, 2013, 44(8): 148-164.

[68] 陈思雨, 张舒慧, 张纾, 等. 基于共聚焦拉曼光谱技术的苹果轻微损伤早期判别分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(2): 430-435.
CHEN S, ZHANG S, ZHANG S, et al. Detection of early tiny bruises in apples using confocal raman spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018, 38(2): 430-435.

[69] 刘燕德, 肖怀春, 孙旭东, 等. 基于共焦显微拉曼的柑橘黄龙病无损检测研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(1): 111-116.
LIU Y, XIAO H, SUN X, et al. Researching of non-destructive detection for citrus greening based on confocal Micro-Raman[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018, 38(1): 111-116.

[70] 代芬, 邱泽源, 邱倩, 等. 基于拉曼光谱和自荧光光谱的柑橘黄龙病快速检测方法[J]. 智慧农业, 2019, 1(3): 77-86.
DAI F, QIU Z, QIU Q, et al. Rapid detection of citrus Huanglongbing using Raman spectroscopy and autofluorescence spectroscopy[J]. Smart Agriculture, 2019, 1(3): 77-86.

[71] SANCHEZ L, PANT S, IREY M, et al. Detection and identification of canker and blight on orange trees using a hand-held Raman spectrometer[J]. Journal of Raman Spectroscopy, 2019, 50(12): 1875-1880.

[72] LIN Y, LIN H, LIN Y. Construction of Raman spectroscopic fingerprints for the detection of *Fusarium wilt* of banana in Taiwan[J]. PLoS ONE, 2020, 15(3): ID e0230330.

[73] GUO Z, WANG M, BARIMAH A O, et al. Label-free surface enhanced Raman scattering spectroscopy for discrimination and detection of dominant apple spoilage fungus[J]. International Journal of Food Microbiology, 2020, 338: ID 108990.

[74] 刘燕德, 靳昙昙. 拉曼光谱技术在农产品质量安全检测中的应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(9): 2567-2572.
LIU Y, JIN T. Application of Raman spectroscopy technique to agricultural products quality and safety determination[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2015, 35(9): 2567-2572.

[75] 徐赛, 陆华忠, 丘广俊, 等. 水果品质无损检测研究进展及应用现状[J]. 广东农业科学, 2020, 47(12): 229-236.
XU S, LU H, QIU G, et al. Research progress and application status of fruit quality nondestructive detection technology[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2020, 47(12): 229-236.

[76] SOOD S, SINGH H. Computer vision and machine learning based approaches for food security: A review[J]. Multimedia Tools and Applications, 2021(3): 1-27.

[77] 窦文卿, 柴春祥, 鲁晓翔. 无损检测技术在水果品质评价中应用的研究进展[J]. 食品工业科技, 2020, 41(24): 354-359.
DOU W, CHAI C, LU X. Research progress of non-destructive detection technique in fruit quality evaluation[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(24): 354-359.
[78] 冯建英, 李鑫, 原变鱼, 等. 智能感官技术在水果检测中的应用进展及趋势[J]. 南方农业学报, 2020, 51(3): 636-644.
FENG J, LI X, YUAN B, et al. Progress and trend of fruit detection by intelligent sensory technology[J]. Southern Journal of Agricultural Sciences, 2020, 51(3): 636-644.
[79] CHEN H, QIAO H, FENG Q, et al. Rapid detection of pomelo fruit quality using near-infrared hyperspectral imaging combined with chemometric methods[J]. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 2021, 8: ID 616943.
[80] 任二芳, 牛德宝, 温立香, 等. 电子鼻和电子舌在水果检测中的应用进展[J]. 食品工业, 2019, 40(10): 261-264.
REN E, NIU D, WEN L, et al. Application research progress of electronic nose and electronic tongue in fruits detection[J]. Food Industry, 2019, 40(10): 261-264.
[81] 袁瑞瑞, 刘贵珊, 何建国, 等. 可见近红外高光谱成像对灵武长枣定量损伤等级判别[J]. 光谱学与光谱分析, 2021, 41(4): 1182-1187.
YUAN R, LIU G, HE J, et al. Quantitative damage identification of Lingwu long jujube based on visible near-infrared hyperspectral imaging[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2021, 41(4): 1182-1187.
[82] YUAN R, LIU G, HE J, et al. Classification of Lingwu long jujube internal bruise over time based on visible near-infrared hyperspectral imaging combined with partial least squares-discriminant analysis[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 182: ID 106043.
[83] HUANG X, YU S, XU H, et al. Rapid and nondestructive detection of freshness quality of postharvest spinaches based on machine vision and electronic nose[J]. Journal of Food Safety, 2019, 39(6): ID e12708.
[84] 徐海霞. 基于机器视觉和电子鼻技术的菠菜新鲜度无损检测研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
XU H. Research on non-destructive testing of spinach freshness based on machine vision and electronic nose technology[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2016.
[85] 陈乾辉, 吴德刚. 基于可见光—红外光图像融合的苹果缺陷检测算法[J]. 食品与机械, 2018, 34(9): 135-138.
CHEN Q, WU D. Algorithm on apple defect detection based on visible light-infrared light image fusion[J]. Food & Machinery, 2018, 34(9): 135-138.
[86] LIU Q, SUN K, ZHAO N, et al. Information fusion of hyperspectral imaging and electronic nose for evaluation of fungal contamination in strawberries during decay[J]. Postharvest Biology and Technology, 2019, 153: 152-160.
[87] 郭守斌, 魏域斌, 魏玉杰. 对我国智慧农业发展的思考与建议[J]. 农业科技与信息, 2021(9): 72-75.
GUO S, WEI Y, WEI Y. Thoughts and suggestions on the development of smart agriculture in China[J]. Agricultural Science and Information, 2021(9): 72-75.
[88] 史亮, 张复宏, 刘文军. 物联网+区块链助力食品质量安全保障[J]. 农业与技术, 2019, 3 9(10): 34-36.
SHI L, ZHANG F, LIU W. The Internet of Things blockchain helps ensure food quality and safety[J]. Agriculture & Technology, 2019, 3 9(10): 34-36.
[89] 笪海波. 智能监控物联网管理在果蔬种植中的应用[J]. 现代农业科技, 2018(20): 99-101.
LA H. Application of intelligent monitoring internet of things management in fruit and vegetable planting[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2018 (20): 99-101.
[90] 郭凌, 刘刚. 基于无线传感器网络的果蔬冷库监控系统设计[J]. 物流工程与管理, 2018, 40(2): 104-105.
GUO L, LIU G. Design of fruit and vegetable preservation monitoring system based on wireless sensor network[J]. Logistics Engineering and Management, 2018, 40(2): 104-105
[91] 王众, 梁早清, 郑业鲁, 等. 语义网技术与区块链技术的交集在农产品质量安全追溯领域的应用[J]. 农业图书情报, 2019, 31(1): 60-68.
WANG Z, LIANG Z, ZHENG Y, et al. Applying the integrated technologies of the semantic web and the blockchain to the agro-products tracing system[J]. Agricultural Library and Information, 2019, 31(1): 60-68.

Research Progress of Sensing Detection and Monitoring Technology for Fruit and Vegetable Quality Control

GUO Zhiming[1,2*], WANG Junyi[1], SONG Ye[3], ZOU Xiaobo[1,2], CAI Jianrong[1]

(1. *School of Food and Biological Engineering*, *Jiangsu University*, *Zhenjiang* 212013, *China*; 2. *International Joint Research Laboratory of Intelligent Agriculture and Agri-products Processing* (*Jiangsu University*), *Jiangsu Education Department, Zhenjiang* 212013, *China*; 3. *Jinan Fruit Research Institute*, *All China Federation of Supply & Marketing Cooperatives*, *Jinan* 250220, *China*)

Abstract: Vegetable and fruit planting areas and products of China have always ranked first in the world, and the vegetable and fruit industry is respectively the second and third largest agricultural planting industry after grain. Vegetables and fruits are prone to quality deterioration during postharvest storage and transportation, resulting in reduced edible value and huge economic losses. To ensure fruit and vegetable quality and reduce the waste of resources caused by postnatal deterioration, this paper summarizes the latest research status of sensor detection and monitoring technology for fruit and vegetable quality deterioration and analyzed the principle, characteristics, advantages, and disadvantages of various detection technology. Among them, machine vision can detect the external quality and surface defects of fruits and vegetables, but fruits and vegetables are different from the standard machined products, and they are affected by many factors in the growth process, which seriously interfere with the image collection work and easily lead to misjudgment. An electronic nose equipped with expensive gas sensors can monitor the odor deterioration of fruits and vegetables but would require improved sensitivity and durability. Near-infrared can detect the internal quality and recessive defects of fruits and vegetables, but the applicability of the model needs to be improved. Hyperspectral imaging can visually detect the internal and external quality of fruits and vegetables and track the deterioration process, but the huge amount of data obtained leads to data redundancy, which puts forward higher requirements for system hardware. Therefore, low-cost multispectral imaging systems should be developed and characteristic wavelength extraction algorithms should be optimized. Raman spectroscopy can detect fruit and vegetable spoilage bacteria and their metabolites, but there is no effective Raman enhanced substrate production and accurate Raman standard spectrogram database. The comprehensive evaluation of fruit and vegetable deterioration can be realized by multi-technology and multi-information fusion. It can overcome the limitation of single sensor information analysis, improve the robustness and parallel processing ability of the detection model, and provide a new approach for high-precision detection or monitoring of fruit and vegetable quality deterioration. The Internet of Things monitoring system is constructed with various sensors as the sensing nodes to realize the intelligent real-time monitoring of fruit and vegetable quality deterioration information, provide a reference for solving the technical limitation of quality deterioration control in the processing of fruit and vegetable. This is of great significance for reducing the postpartum economic loss of fruits and vegetables and promoting the sustainable development of the fruit and vegetable industry.

Key words: intelligent perception; nondestructive detection; quality deterioration; Internet of Things; machine vision; hyperspectral; near-infrared; Raman spectroscopy; electronic nose